

مهندسی عمران فردوسی

https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/



مدل‌سازی عددی سه‌بعدی اندرکنش گسل شیب‌لغز و تونل با پوشش بتنی*

مقاله پژوهشی

محمدامین برفه‌ئی(۱) مهدا مرتضوی زنجانی(۲) عباس سروش(۳)

DOI :10.22067/jfcei.2022.70954.1043

چکیده در این مقاله تأثیر جابه‌جایی گسل شیب‌لغز معکوس بر تونلی عمود بر خط گسل در پلان با نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس سه‌بعدی مطالعه شده و اثر زاویه گسل، نوع خاک منطقه و عمق قرارگیری تونل بر «مسیر انتشار گسلش»، «نمودارهای جابه‌جایی سطح خاک» و «تغییر شکل و نیروهای وارد بر پوشش تونل» ارائه شده‌اند. نتایج تحلیلها نشان می‌دهد که تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالا سر خود (در محور تونل) شده، حال آنکه موجب بالازدگی نسبی خاک در دو طرف آن در سطح زمین می شود. علاوه بر آن در تونل عمیقتر، نیروی وارده بر پوشش تونل (نیروی محوری و لنگر خمشی) در اثر جابه‌جایی گسل بیشتر است. همچنین با آنالیز حساسیت برای کاهش اثر مرز، نسبت ابعادی مناسب برای مدل‌سازی اندرکنش تونل و گسل پیشنهاد شده است. بررسیها نشان می‌دهد که نیروی محوری به خصوص در زوایای گسل ملایم به طول مدل حساس است حال آنکه لنگر خمشی در مدل سازی با ابعاد متعارف (۵-٤ برابر عمق لایه خاک) به طور مناسب قابل ارزیابی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی انتشار گسلش، مدل‌سازی عددی اجزای محدود، تحلیل سه‌بعدی، تونل، پوشش بتنی.

Three-Dimensional Numerical Modeling of Interaction of Dip-Slip Fault and Tunnels with Concrete Lining

Mohammad Amin Barfehee Mahda Mortazavi Zanjani Abbas Soroush

Abstract *In this paper, the effect of reverse dip-slip fault movement on a tunnel, being perpendicular to the fault plane in plan view, is modeled numerically with finite-element software, Plaxis 3D and the effect of factors such as fault dip angle, soil type and tunnel's depth on "fault rupture path", "ground surface displacements" and "deformation and forces in the tunnel lining" is presented. The results indicate that the presence of tunnel gives rise to zones of stain localization in the soil underneath the tunnel and somewhat prevents the rupture zone to reach the ground surface on its top (centerline of the tunnel) whereas it causes relative uplift on the ground surface on both sides. Moreover, in deeper tunnels, the impact of faulting on lining forces is more pronounced. Furthermore, to reduce the influence of the outer boundaries, performing sensitive analysis, appropriate dimensions are recommended for modeling the interaction of fault and tunnel. It is shown that axial force, especially in mild fault dip angles, is very sensitive to model length while bending moment can be correctly estimated by typical modeling dimensions (i.e., model length 4-5 times the soil layer height).*

Keywords Fault Rupture Propagation, Finite Element Numerical Modeling, Three-Dimensional Analysis, Tunnel, Concrete Lining.

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۳/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۱/۹/۲۹ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، واحد دانشگاهی گرمسار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر .

(۲) نویسنده مسئول: استاد مدعو، واحد دانشگاهی گرمسار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Email:mortazavim@aut.ac.ir

مقدمه

تا پیش از زمین‌لرزه‌های سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان (کوجایلی، دوزکه و چی‌چی) که موجب خرابیهای بسیار سازه‌های زیرزمینی گردید، باور عموم جامعه مهندسی بر این بود که سازه‌های زیرزمینی به دلیل محصور بودن در میان خاک از آسیبهای ناشی از لرزه در امانند. ولی بعد از این وقایع تحقیقات جدی و گسترده در مورد اثرات لرزش زمین و همچنین جابه‌جایی ماندگار ناشی از گسلش بر این سازه‌ها شدت گرفت.

پدیده انتشار گسلش در لایه خاک در سال ۱۹۹٤ توسط بری و همکاران [1] با روش اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. آنها به تأثیرپذیری مسیر گسلش از زاویه صفحه گسل، انواع حرکت گسل، میزان جابه‌جایی گسل، عمق لایه خاک و نوع خاک محل پرداختند. در بررسیهای میدانی تأثیر نوع خاک بر گسلش، دریافتند که در خاکهای سختتر گسلش در جابه‌جایی پایه کمتری به سطح زمین می‌رسد. بعد از آن، بررسیهای متعدد آزمایشگاهی مانند یوهانسون و کاناگایی ، آناستوپولوس و همکاران [2,3] و مدل‌سازیهای عددی مانند لین و همکاران، لاکیدیس و همکاران [4,5] تأثیر پارامترهای مختلف را بر پدیده گسلش در لایه خاک مورد مطالعه قرار دادند. در ادامه با مدل‌سازی عددی گسل معکوس در ماسه دولایه و چندلایه، وقوع انکسار در مسیر گسلش و شکل‌گیری الگوهای مختلف مسیر گسلش در خاک چند لایه نشان داده‌شد [6,7]. همچنین پدیده انتشار گسلش با روشهای عددی دیگر مانند روش المان مجزا [8-11] مدل‌سازی شد. بررسی رفتار سدهای خاکی تحت اثر گسلش [12,13] و تأثیر عمق دفن در اندرکنش گسل و فونداسیون [14] ابعاد بیشتری از پدیده گسلش را روشن کرد.

در سالهای اخیر بررسی اندرکنش گسل و سازه‌های مدفون مانند لوله و تونل با روشهای آزمایشگاهی انجام شده است. بازیار و همکاران [15] با بررسی اندرکنش گسل شیب‌لغز معکوس و تونل با کمک آزمایش سانتریفیوژ دریافتند سازه‌های زیرزمینی نظیر تونلها می‌توانند بر مسیر گسلش تأثیر بگذارند که با افزایش صلبیت تونل و افزایش عمق قرارگیری آن فشار ناشی از گسلش بر تونل بیشتر می‌گردد. در پژوهش آنها راستای طولی تونل موازی خط گسل در پلان قرار داشت.

رجحانی و همکاران (۲۰۱۲) [16] با بررسی نتایج چهار آزمایش سانتریفیوژ با تمرکز بر رفتار لوله‌های فولادی پیوسته مدفون تحت اثر گسلش معکوس، نشان دادند با تغییرات قطر و عمق دفن لوله‌ها، مکانیزم تغییر شکل لوله و نوع خرابی به طور اساسی تغییر می‌کند. کیانی و همکاران [17] با انجام آزمایشهای سانتریفیوژ، تأثیر انتشار گسلش نرمال را بر روی تونل با پوشش قطعه‌ای بررسی کردند.

بررسی پدیده گسلش در اندرکنش با تونلها با روشهای عددی هم صورت گرفته است. جوشی و همکاران [18] با روش اجزای محدود و فرض ساده المان تیر برای لوله، تأثیر زاویه قرارگیری خط لوله نسبت به خط گسل را بررسی کردند و همچنین به راهکارهای کاهش خطر گسلش همچون کاهش عمق دفن در محل گسل و استفاده از خاکریزی با مصالح سست اشاره کردند. هاشم‌زاده و سروش [19] با مدل‌سازی سه‌بعدی لوله مدفون تحت گسل امتدادلغز نشان دادند کرنش طولی خط لوله در ماسه‌های سختتر افزایش می‌یابد و کمانش موضعی لوله در جابه‌جایی گسل کمتری به وقوع می‌پیوندد.

رنجبرنیا و همکاران [20] با تحلیل تفاضل محدود سه‌بعدی، تونلهای بتنی کم‌عمق را تحت اثر گسلش شیب‌لغز معکوس و نرمال مطالعه کردند و نشان دادند که با افزایش عمق، جابه‌جایی بیشتری در هر دو نوع گسل به تونل وارد می‌شود.

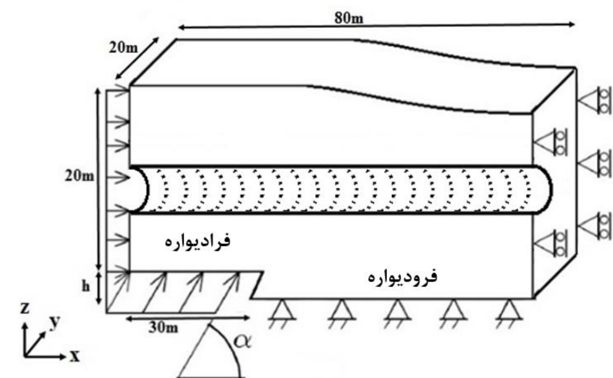
در مقاله حاضر به کمک مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس سه‌بعدی [21] به تحلیل سه‌بعدی گسل شیب‌لغز معکوس با راستای عمود بر محور طولی تونل پرداخته شده و در آن اثر زاویه گسل، نوع خاک و عمق قرارگیری تونل بر مسیر انتشار گسلش، جابه‌جایی سطح زمین، تغییر شکل پوشش تونل و نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل بررسی شده است. لازم به ذکر است که منظور از نیروی محوری و لنگر خمشی در اینجا، نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل (lining) می‌باشد. همچنین در این مقاله تلاش شده است یافته‌های عددی به نتایج کاربردی منجر شود و توصیه‌هایی برای طراحی ایمن تونل در برابر گسلش ارائه شده است.

معرفی کلی مسئله

برای مدل‌سازی عددی سه بعدی انتشار گسلش شیب لغز معکوس، حجمی از خاک به عمق ۲۰ متر و به طول چهار برابر عمق لایه خاک (۸۰ متر)، به منظور کاهش اثر مرزها، و نیز عرض

۴۰ متر در نظر گرفته شد که به جهت تقارن عرضی مسئله نیمی از عرض به اندازه ۲۰ متر مدل شده است. سطح خاک افقی در نظر گرفته شده و حرکت گسل که از اعماق سنگ بستر صلب شروع شده با زاویه α به فصل مشترک سنگ بستر-خاک می‌رسد. برای مدل‌سازی حرکت گسل، قسمت سمت راست مدل (فرودیواره) ثابت و جابه‌جایی به سطح پایین سمت چپ و قسمت عمودی سمت چپ (فرادیواره) مدل وارد می‌گردد (شکل ۱). فاصله گسل از سطح قائم سمت فرادیواره ۳۰ متر و زاویه گسل با افق به دو صورت ٦٠ درجه و قائم در نظر گرفته شده است. میزان جابه‌جایی سنگ بستر ۰٫۸ متر در راستای قائم فرض شده است که مؤلفه افقی جابه‌جایی با توجه به زاویه گسل مشخص خواهد شد. جابه‌جایی به صورت استاتیکی بر بدنه خاک اعمال می‌شود و از آثار دینامیکی حرکت زمین صرف نظر می‌گردد.

تونلی بتنی به شعاع ۲/۱۲ متر در دو موقعیت سطحیتر و عمیقتر (عمق قرارگیری محور تونل از سطح خاک به ترتیب ٦ متر و ۱۱ متر) در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ هندسه سه بعدی مدل‌سازی اجزای محدود

لایه خاک در نظر گرفته شده در این مسئله از نوع ماسه خشک بوده و دو نوع ماسه متراکم (DS) و سست (LS) برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. مشخصات دو نوع خاک در جدول (۱) آمده است. مشخصات تونل و مصالح آن نیز به شرح جدول (۲) می‌باشد.

بدین ترتیب حالتهای مختلف در نظر گرفته شده در این تحقیق با تغییر موارد زیر مشتمل بر ۱۲ حالت می‌باشد: نوع خاک (ماسه متراکم و سست) (جدول ۱)، زاویه گسل (٦٠ درجه و قائم)، شرایط میدان آزاد (عدم حضور تونل) و قرارگیری تونل در دو موقعیت سطحیتر و عمیقتر (عمق قرارگیری محور تونل از سطح خاک به ترتیب ٦ متر و ۱۱ متر) (جدول ۲)

جدول ۱ مشخصات خاک

نوع خاک	$\gamma_{unsat}(kN/m^3)$	$E'(MPa)$	ν'	$\psi'(^\circ)$	$\varphi'(^\circ)$
ماسه متراکم	۱۸	۲۰	۰/۳	۸	۳۸
ماسه سست	۱۶	۱۰	۰/۳	۰	۳۰

جدول ۲ مشخصات بتن پوشش تونل

شعاع میانی (m)	ضخامت (m)	$\gamma(KN/m^3)$	$E(GPa)$	ν	نوع رفتار
۲/۱۲	۰/۲۴	۲۳/۵	۲۵	۰/۲	الاستیک

مدل‌سازی عددی. مدل موهر-کولمب مدل مناسبی برای بررسی رفتار خاک است و در کارهای گذشته بررسی گسلش هم از این مدل استفاده شده است. در اینجا برای معرفی رفتار خاک، مدل رفتاری موهر-کولمب الاستیک-کاملاً پلاستیک با قانون جریان غیرهمبسته (Nonassociated flow rule) در نظر گرفته شد. همچنین در مورد پوشش بتنی تونل فرض شده است که رفتار الاستیک داشته باشد.

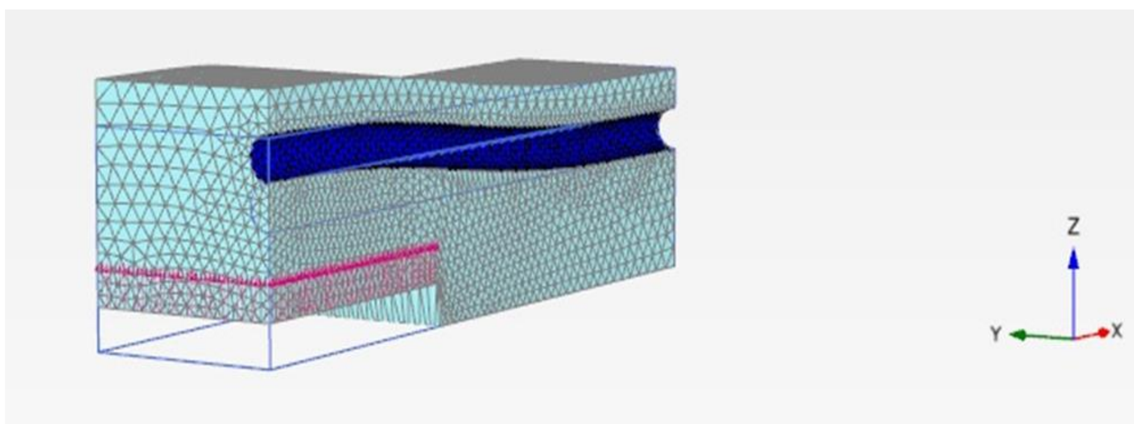
برای مدل‌سازی فصل مشترک خاک و بتن از المانهای رابط (interface) دارای اصطکاک و چسبندگی استفاده می‌شود. روابط زیر برای محاسبه مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی آنها ارائه شده است.

$$\tan\varphi_{inter} = R_{inter}\tan\varphi_{soil} \qquad (۱)$$

$$C_{inter} = R_{inter}C_{soil} \qquad (۲)$$

با توجه به رابطه بالا و φ_{inter} پیشنهادی بازیار و همکاران ($\varphi_{inter} = 22^\circ$) مقدار $R_{inter} = 0.517$ به دست می‌آید.

نوع المان مورد استفاده برای خاک، المان چهاروجهی ده گرهی و المان مورد استفاده برای پوشش تونل المان plate مثلثی شش گرهی است.



شکل ۲ نمایش مش‌بندی و تغییر شکل زمین و تونل بعد از وقوع گسلش

به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، آزمایش سانتریفیوژ بازیار و همکاران [15] به صورت عددی مدل‌سازی شد و جابه‌جایی گسل شیب‌لغز معکوس با زاویه گسل ٦۰ درجه با سه اندازه جابه‌جایی قائم مختلف سنگ بستر در شرایط بدون حضور تونل و با حضور تونل اعمال شد، مقایسه نتایج تغییر شکل سطح زمین در آزمایش سانتریفیوژ با مدل‌سازی عددی انطباق خوبی را نشان می‌دهد. شرایط مش‌بندی و تغییر شکل مسئله در حالت گسل با زاویه قائم و تونل سطحی‌تر در شکل (۲) نشان داده شده است.

بررسی نتایج

مسیر انتشار گسلش (جابه‌جایی زمین و تونل). عملکرد گسلها عموماً موجب به‌وجود آمدن جابه‌جایی‌های برشی مهمی در سطح زمین و همچنین سازه‌های سطحی و مدفون می‌شود. این جابه‌جاییهای اضافی تحمیل شده بر سازه، عملاً در طراحیهای اولیه در نظر گرفته نمی‌شود و ممکن است پایداری سازه‌ها را برهم بزند؛ لذا بررسی این آثار بر روی سازه‌ها بسیار با اهمیت می‌باشد.

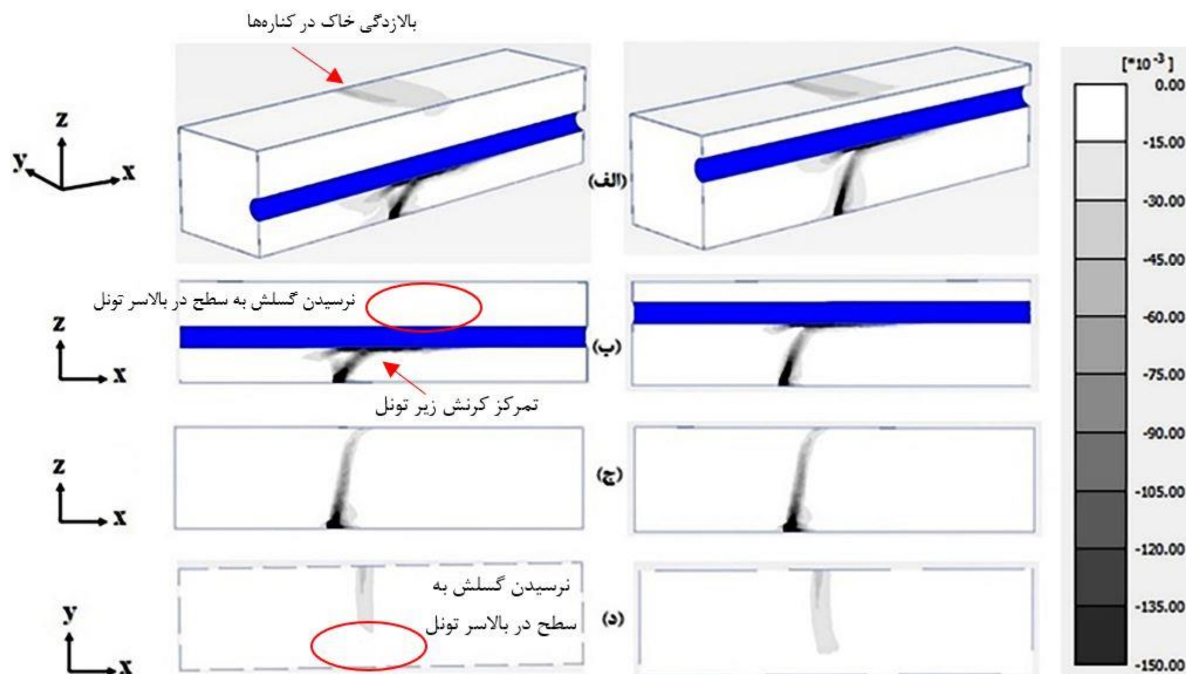
در این پژوهش مسیر انتشار گسلش، که کرنش برشی بیشینه معرف آن است، در حالتهای مختلف مسئله و برای دو زاویه مختلف گسل (زاویه ٦۰ و ۹۰ درجه)، دو نوع خاک (خاک ماسه-ای متراکم و یا سست) و تونل سطحیتر و عمیقتر بررسی شده و به نحوه اثر تونل بر این پدیده پرداخته شده است. شکل (۳) نمونه‌ای از مسیر انتشار گسلش را در دو حالت تونل سطحیتر (سمت راست) و تونل عمیقتر (سمت چپ)، با فرض خاک سست و گسل با زاویه ٦۰ درجه در مدل سه بعدی نشان می‌دهد.

در این شکل وضعیت توزیع کرنش در مقاطع مختلف نشان داده شده است.

شکل (۳-الف) برشی سه بعدی از وسط تونل و خاک است. صفحه قائم میانی که تونل در آن قرار دارد شکل (۳-ب) و صفحه قائم کناری (شکل ۳-ج) و سطح زمین (شکل ۳-د) تصویر مناسبی از تغییرشکلها ارائه می‌دهند. در این شکل مشخص است که مسیر گسلش در محدوده تونل با کناره‌ها متفاوت است (شکل ۳-ب در مقایسه با شکل ۳-ج) . این تفاوت در رخنمون گسلش در سطح زمین در بالای محور تونل و کناره‌ها هم مشهود است (شکل ۳-د).

بررسی این شکل نشان می‌دهد که تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالاسر خود شده است (شکل ۳-الف و ب). در حالی که با فاصله گرفتن از تونل در جهت عرضی (در جهت محور y) تأثیر حضور تونل نیز تقریباً از بین رفته است (شکل ۳-د) و در صفحات کناری (شکل ۳-ج) مسیر گسلش مطابق شکل زمین آزاد (free field) شکل می‌گیرد.

به بیان ساده‌تر حضور تونل باعث ایجاد بالازدگی نسبی در خاک دو طرف می‌شود. توجه به این تغییرشکل غیریکنواخت، به لحاظ مهندسی اهمیت دارد زیرا سازه‌های سطحی را تحت تغییر شکل غیریکنواخت قرار می‌دهد و به خصوص در بالا سر سازه‌های مدفون دارای صلبیت زیاد (مانند تونلهای شهری یا لوله‌های قطور) خطرساز خواهد شد.



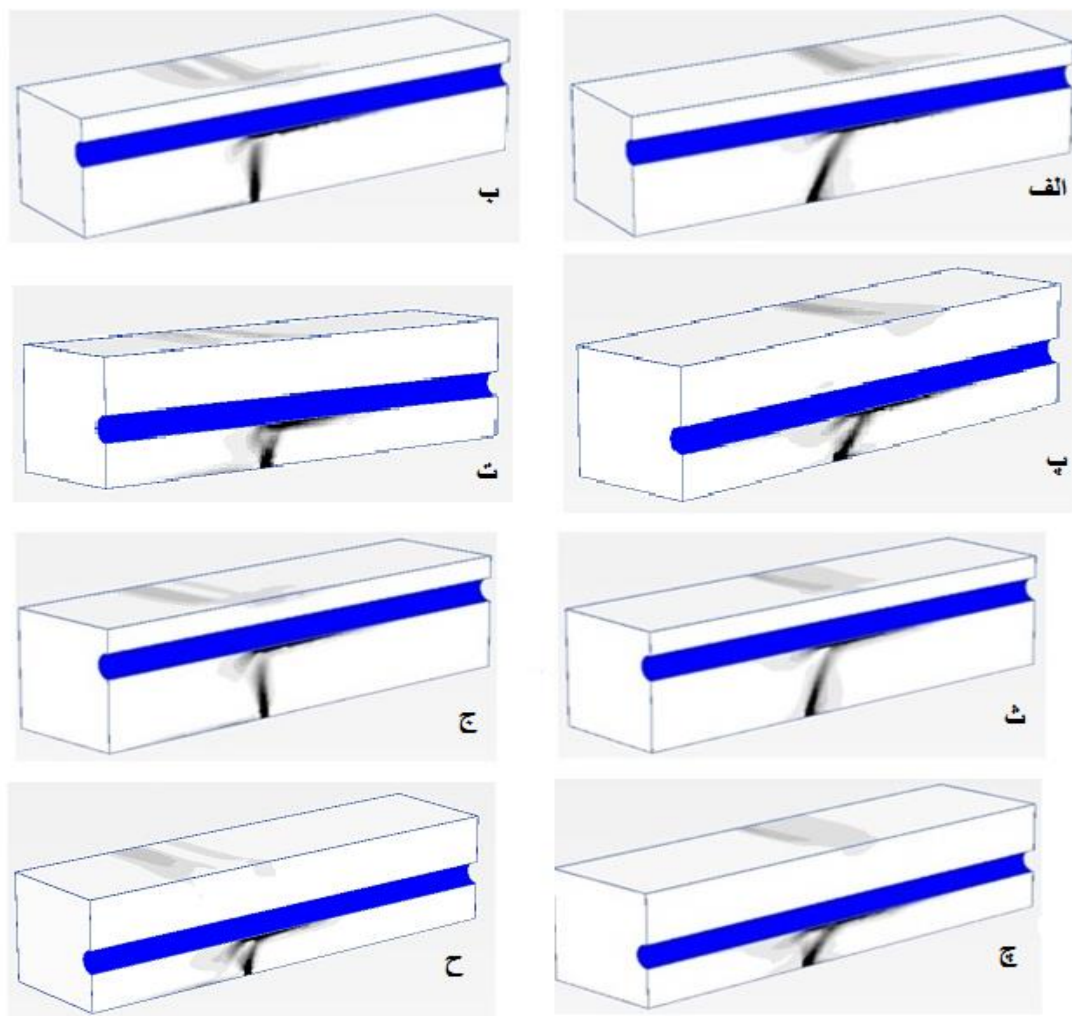
شکل ۳ بررسی نحوه انتشار گسلش (کانتورهای کرنش برشی بیشینه) در دو حالت تونل سطحیتر (سمت راست) و تونل عمیقتر (سمت چپ)، با فرض خاک سست و گسل با زاویه ٦۰ درجه: الف) تصویر سه بعدی، ب) برش از محور تونل، صفحه y=0، ج) تصویر در صفحه کناری، y=20، د) تصویر در سطح زمین

اثر سه عامل مهم یعنی جنس خاک، زاویه گسل و عمق قرارگیری تونل در خاک بر تغییرشکلهای ناشی از انتشار گسلش، به صورت نواحی کرنش برشی بیشینه، در شکل (٤) نشان داده شده است. مقایسه کرنشها در تونل عمیق و کم‌عمق برای خاک یکسان (مثلاً شکل ٤-الف و پ برای خاک متراکم) نشان می‌دهد که هنگامی که تونل عمیقتر باشد، بیشتر جابه‌جایی ناشی از گسلش را در خود جذب می‌کند و تمرکز کرنش کمتری در سطح زمین بالاسر تونل و کناره‌ها مشاهده می‌شود. از سوی دیگر هنگامی که عمق تونل بیشتر باشد، در زیر تونل و پوشش آن کرنشهای بیشتری توسعه می‌یابد که منجر به تنشهای بیشتر خواهد شد. این مطلب در ادامه در بررسی نیروی محوری و لنگر خمشی در تونل کم عمق و عمیق (شکل ۱۱ و ۱۲) خواهد آمد.

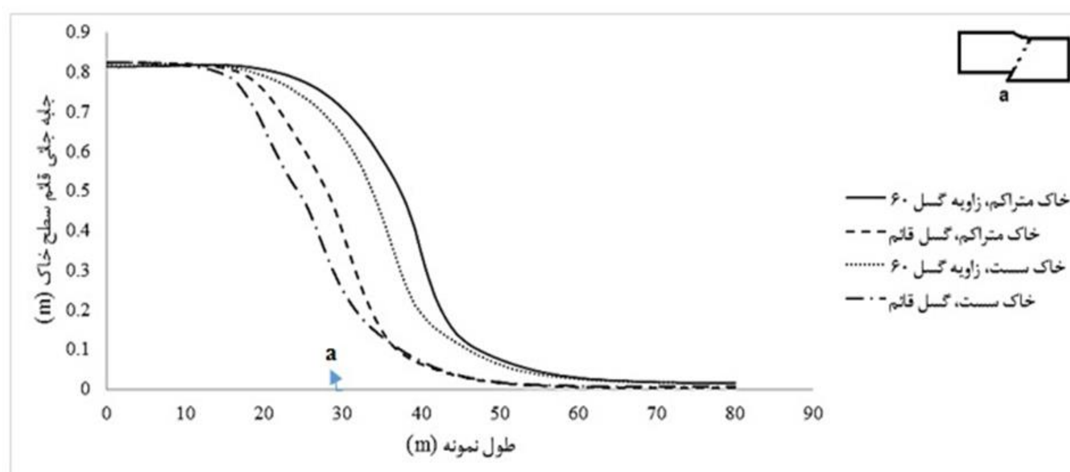
در خاک متراکم نسبت به خاک سست با عمق تونل یکسان (مثلاً مقایسه شکل ٤-الف و ث) تمرکز کرنش بیشتری در زیر تونل و سطح خاک مشاهده می‌شود. این مطلب با یافته‌های پیشین در مورد تمرکز بیشتر کرنش در خاکهای متراکم، که به معنی محدوده باریکتر گسلش است، سازگار است [22].

تحقیقات پیشین انتشار گسلش در بررسی جابه‌جاییهای سطح زمین در شرایط لایه خاک-بدون حضور تونل (Free Field) نشان داده است که افزایش تراکم خاک و کمتر شدن زاویه گسل (α) هر دو باعث انتقال جابه‌جاییها به سمت فرودیواره می‌گردند (مرتضوی و همکاران، ۲۰۱۲) [23]. این مطلب در پژوهش حاضر هم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج (شکل ٥) یافته‌های قبلی را تأیید کرد.

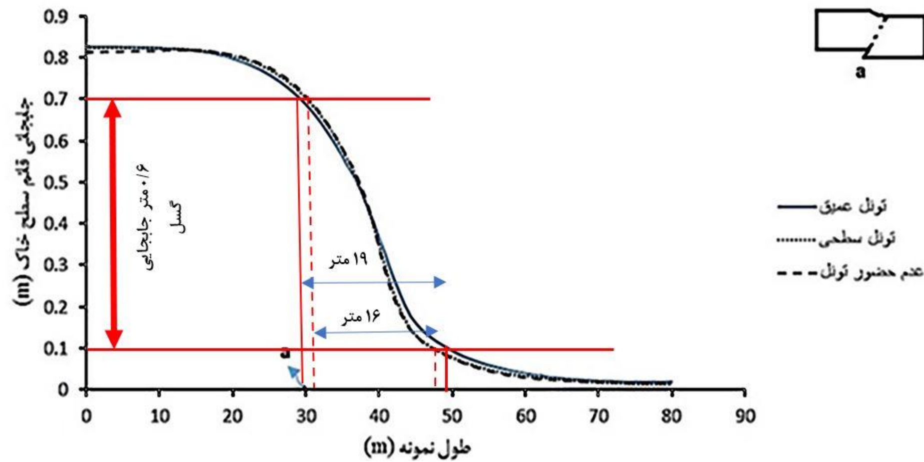
شکل (٦) تغییر شکل سطح زمین را در خاک متراکم و زاویه گسل ٦۰ درجه در دو حالت تونل عمیقتر و تونل سطحیتر در مقایسه با حالت زمین آزاد (عدم حضور تونل) نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که حضور تونل باعث می‌شود تغییر شکل سطح زمین در بالاسر آن توزیع ملایمتری (شیب ملایمتر) داشته باشد که در تونل عمیق این تأثیر نیز بیشتر می‌شود. در واقع حضور تونل و هر چه عمیقتر بودن آن، موجب تمرکز کرنش در زیر خود و کاهش تمرکز کرنش در لایه‌های بالاسر خاک (محور تونل) می‌شود. چنان چه در این شکل مشاهده می‌شود در سطح زمین جابه‌جایی ۰/٦ متر از گسل، در شرایط عدم حضور گسل در عرض ۱٦ متر و در شرایط حضور تونل عمیق در ۱۹ متر پخش شده است. این امر در ترکیب با بالازدگی خاک در دو طرف تونل (شکل ۳) وضعیت غیریکنواختی از نظر توزیع عرضی تغییرشکلها در سطح زمین ایجاد می‌کند.



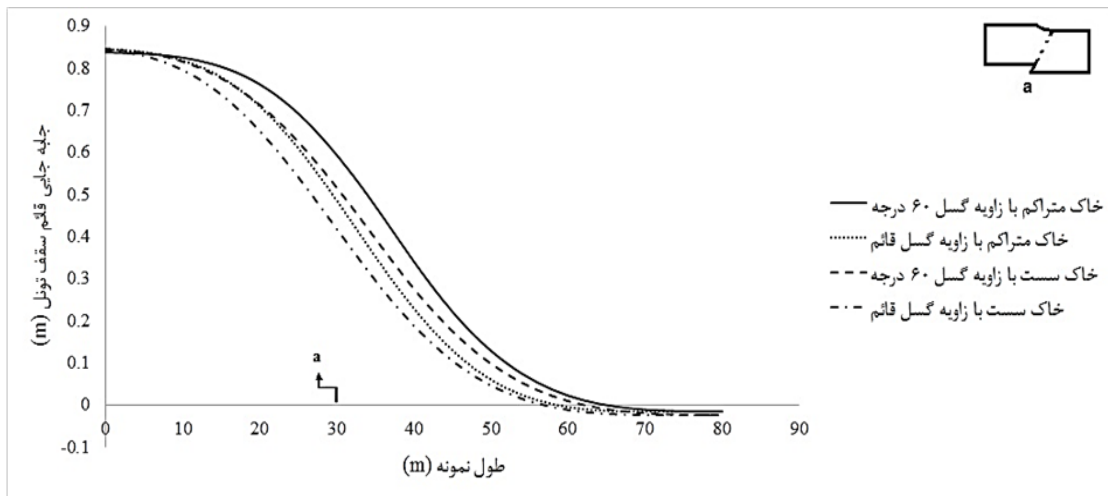
شکل ٤ کانتورهای کرنش برشی بیشینه در اثر گسلش در لایه خاک: الف) خاک متراکم، زاویه ٦۰ درجه و تونل سطحیتر، ب) خاک متراکم، زاویه ۹۰ درجه و تونل سطحیتر، پ) خاک متراکم، زاویه ٦۰ درجه و تونل عمیقتر، ت) خاک متراکم، زاویه ۹۰ درجه و تونل عمیقتر، ث) خاک سست، زاویه ٦۰ درجه و تونل سطحیتر، ج) خاک سست، زاویه ۹۰ درجه و تونل سطحیتر، چ) خاک سست، زاویه ٦۰ درجه و تونل عمیقتر، ح) خاک سست، زاویه ۹۰ درجه و تونل عمیقتر



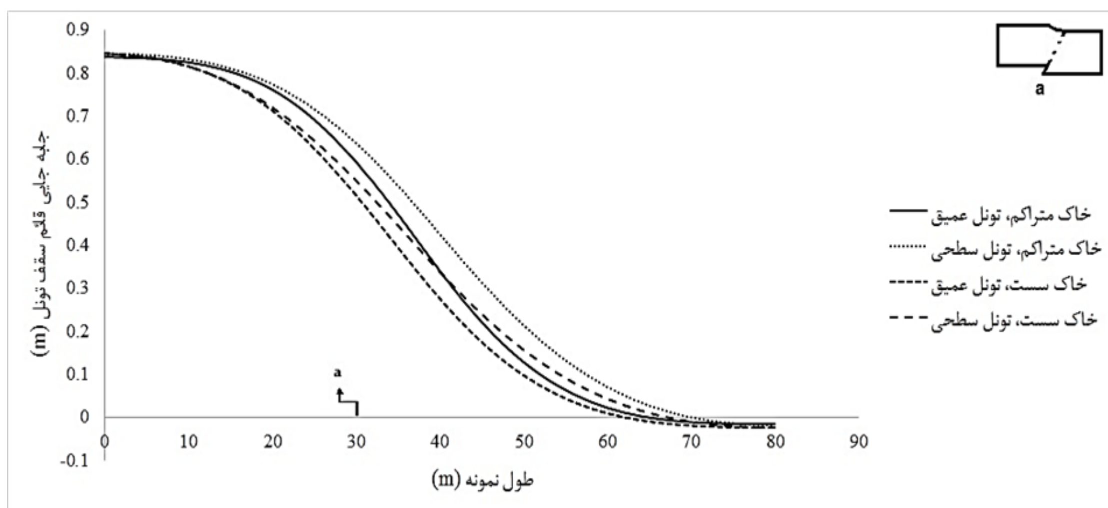
شکل ٥ نمودار تغییر شکل سطح زمین بعد از گسلش در حالت میدان آزاد (عدم حضور تونل) با تغییر نوع خاک و زاویه گسل



شکل ٦ تغییر شکل سطح زمین در خاک متراکم و زاویه گسل ٦٠ درجه (توزیع ملایمتر شیب زمین در حالت بدون تونل)



شکل ٧ تأثیر جنس خاک بر میزان جابه‌جایی قائم ایجاد شده در سقف پوشش تونل (تونل عمیقتر) در دو زاویه قائم و ٦٠ درجه



شکل ٨ تأثیر عمق تونل بر جابه‌جایی قائم سقف پوشش تونل در زاویه گسل ٦٠ درجه در دو نوع خاک متراکم و سست

شکل (۷) میزان جابه‌جایی قائم ایجاد شده در سقف پوشش تونل بر اثر گسلش در دو نوع خاک متراکم و سست و دو زاویه قائم و ٦۰ درجه در حالت حضور تونل عمیقتر را نشان می‌دهد. شکل (۸) جابه‌جایی قائم سقف پوشش تونل در دو نوع خاک متراکم و سست در زاویه گسل ٦۰ درجه را برای عمقهای مختلف تونل نشان می‌دهد. از این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که تراکم بیشتر خاک و ملایمتر شدن زاویه صفحه گسل هر دو، باعث انتقال جابه‌جایی‌های ایجاد شده در پوشش تونل به سمت فرودیواره می‌شوند. شیب ملایمتر جابه‌جایی در شرایط تونل عمیق در این شکل هم دیده می‌شود.

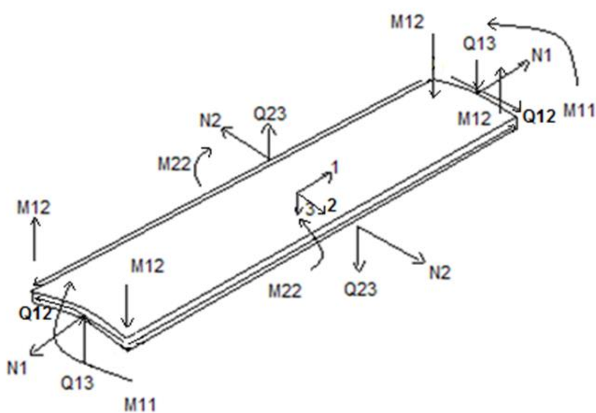
نیروهای وارد بر پوشش تونل. در اثر جابه‌جایی گسل، پوشش تونل تحت نیرو و لنگر در جهتهای مختلف قرار می‌گیرد. در نرم‌افزار پلکسیس سه‌بعدی، داده‌های خروجی برای یک صفحه (Plate) شامل تغییرشکلها و نیروها مطابق شکل (۹) می‌باشد. پدیده گسلش به طور عمده باعث به وجود آمدن خمش در راستای طولی تونل (M11) و نیروهای کششی (فشاری) N1 در طول محور تونل می‌شود. طبق قرارداد در پلکسیس نیروی محوری در کشش مثبت (+) و در فشار منفی (-) در نظر گرفته می‌شود. علامت ممانهای خمشی و نیروهای برشی نیز به سیستم مختصات محلی صفحه بستگی دارد.

بررسی نیروی محوری ایجاد شده در ناحیه سقف پوشش تونل در طول محور آن در گسلهای با زاویه ٤٥، ٦۰، ۷٥ و ۹۰ درجه برای خاک متراکم و تونل سطحی (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که با ملایمتر شدن زاویه گسل، نیروی محوری فشاری ایجاد شده در پوشش تونل به طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در اینجا زوایای گسل ٤٥ و ۷٥ درجه برای بررسی کاملتر به تحلیلها اضافه شده‌است.

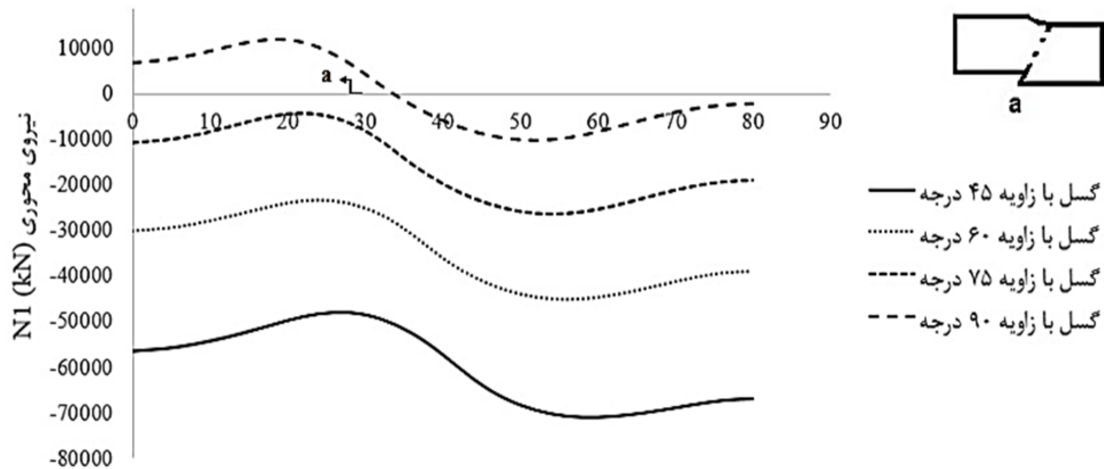
علاوه بر این، شکل (۱۰) نشان می‌دهد که در گسل قائم بخشی از سقف تونل به کشش می‌افتد ولی در گسلهای با زاویه ٤٥ تا ۷٥ درجه سقف تونل تماماً تحت فشار قرار می‌گیرد.

همچنین از بررسی تأثیر عمق تونل در زاویه‌های گسل قائم و ٦۰ درجه در حالت خاک متراکم (شکل ۱۱) به نظر می‌رسد که در تونل سطحیتر، محدوده تغییرات نیروی محوری کمتر است (به عنوان مثال در زاویه ۹۰ درجه، تفاضل ماکزیمم تا مینیمم نیروی محوری در تونل سطحیتر ۲۱۰۰ کیلونیوتون و در تونل عمیقتر ۳۰۰۰ کیلونیوتون است). این بدان معنی است که در تنشهای محدود کننده بیشتر (که در عمق بیشتر اتفاق می‌افتد) نیروی محوری بیشتری در اثر گسلش در تونل شکل می‌گیرد که در طراحی باید مورد توجه قرار گیرد.

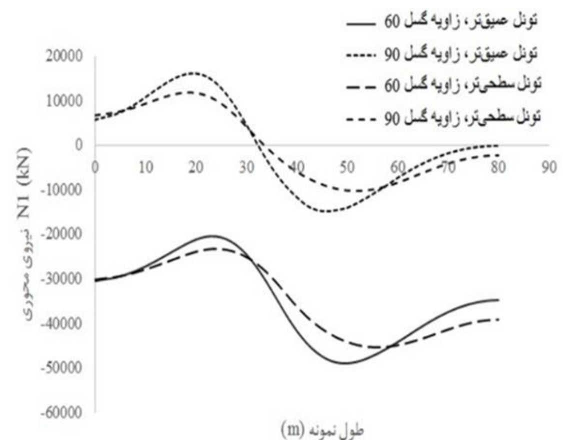
شکل (۱۲) نمودار لنگر خمشی را در حالت خاک متراکم در دو زاویه ٦۰ درجه و ۹۰ درجه و در دو حالت تونل سطحیتر و تونل عمیقتر نشان می‌دهد. براساس این نتایج در گسل با زاویه ٦۰ درجه نسبت به گسل قائم، نمودار لنگر خمشی ایجاد شده در سقف تونل به سمت فرودیواره جابه‌جا شده‌است و در تونل عمیقتر مقادیر لنگر خمشی بیشتر از تونل سطحیتر (در زاویه گسل مشابه) می‌باشد. این مسئله بار دیگر اهمیت طراحی پوشش تونل در تونلهای عمیق را نشان می‌دهد.



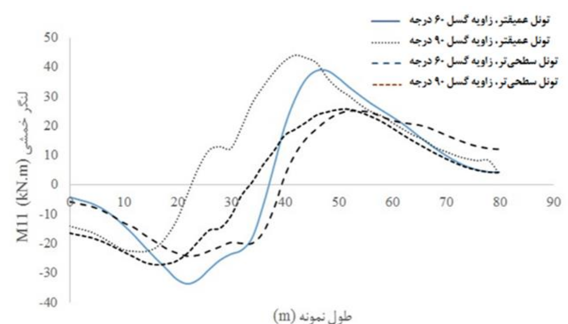
شکل ۹ معرفی نیروها و لنگرها در پوشش تونل



شکل ۱۰ نیروی محوری سقف تونل در طول محور تونل در گسلهای با زاویه ٤٥، ٦٠، ٧٥ و ۹۰ درجه در خاک متراکم و تونل سطحی (مقادیر مثبت کشش و منفی فشار)



شکل ۱۱ تأثیر عمق تونل بر نیروی محوری در طول مدل در زاویه‌های گسل قائم و ٦٠ درجه در خاک متراکم



شکل ۱۲ : نمودار لنگر خمشی در حالت خاک متراکم در دو زاویه ٦٠ درجه و ۹۰ درجه و در دو حالت تونل سطحیتر و تونل عمیقتر

بررسی اثر مرز

در مدل‌سازی سازه‌های طویل همچون تونل، افزایش طول مدل به افزایش تلاش محا سباتی منجر می شود. لذا لازم ا ست طول بهینه برای مدل‌سازی سازه انتخاب شود. معیار این انتخاب، حصول اطمینان از صحت نتایج است.

در مدل‌سازی اولیه با توجه به توصیه مراجع برای لایه خاک، طول مدل ۸۰ متر (٤ برابر عمق لایه خاک) انتخاب شد. به منظور بررسی اثرات مرزبندی، با افزایش طول مدل از ۸۰ متر به دو طول ۱۸۰ متر (اضافه کردن ۵۰ متر به ابتدا و انتهای مدل) و ۲۸۰ متر (اضافه کردن ۱۰۰ متر به ابتدا و انتهای مدل)، مورد بررسی قرار گرفته است. شایان ذکر است که به عنوان معیار بررسی از بین نتایج متنوع، می‌توان پارامترهای هدف متعددی را، مانند تغییر شکل سطح زمین، جابه‌جایی و کرنش در سقف و کف تونل، و نیروها در پوشش تونل، مد نظر قرار داد. از این بین، تنشها (نیروها) در پوشش تونل می‌توانند نماینده مناسبی برای سایر پارامترها باشند زیرا به دلیل رفتار الاستیک بتن، تنشها و کرنشها به صورت خطی با یکدیگر تناسب دارند. از سوی دیگر بررسی مقادیر نیروها و لنگرها، امکان انجام طراحی سازه‌ای را هم فراهم می‌کند. لذا در این مقاله برای مقایسه اثر مرز در مدلهای با طول ۸۰، ۱۸۰،۲۸۰ از نمودارهای نیروی محوری (N1) و لنگر خمشی (M11) استفاده شده است.

محل اعمال گ سل در تمامی مدلها بر روی مبدأ مخت صات قرار دارد. در شکل (۱۳) نمودار نیروی محوری (N1) وارد بر

پوشـــش تونل در طول مدل، در مدلهای با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری و برای زاویه‌های گســل ٤٥، ٦٠ و ۹۰ درجه رسـم شده است. در این شکل نتایج مدلهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری، از تفاوت در طول آنها قابل تشخیص می‌باشند.

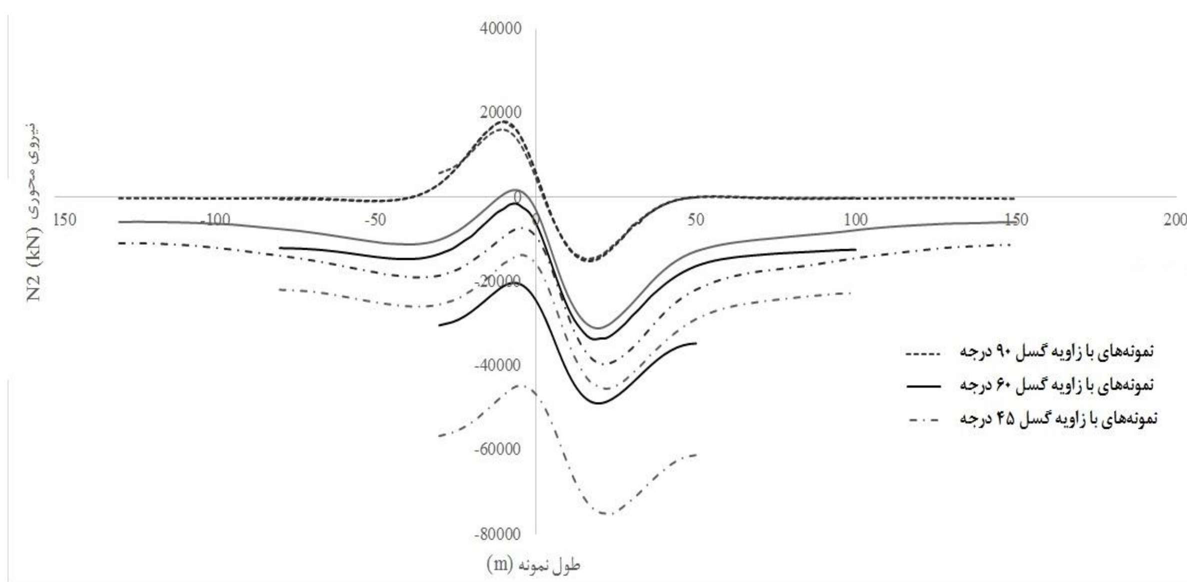
با توجه به شــکل (۱۳) در زاویه گســل کمتر (گســل ٤٥ درجه در مقایسه با گسل ۹۰ درجه)، حساسیت نیروی محوری به طول مدل انتخابی زیاد است. به طوری که برای زاویه گسل ٤٥ درجه، با افزایش طول مدل از ۸۰ متر به ۲۸۰ متر (واقعیتر شدن مدل‌سازی)، نیروی محوری فشاری وارد بر پوشش تونل کاهش قابل توجهی می‌یابد. این در حالی است که در گسل با زاویه قائم با افزایش طول مدل، تغییر چندانی در نیروی فشاری وارد بر پوشش تونل (N1) ایجاد نمی‌شود.

بنابراین در مدل‌ســازی انتشــار گســلش در زوایای گســل ملایمتر، جهـت حـذف اثرات نـامطلوب مرز، انتخـاب طول بیشــتری برای مدل توصــیه می‌شــود. چنان چه در مدل‌ســازی عددی، ابعاد متداول در ادبیات (طول حدود ٤–٥ برابر عمق لایه خاک) استفاده شده باشد، تفسیر نتایج نمودارهای نیروی محوری، نیاز به اصلاح در زوایای گسل کمتر (به خصوص ٤٥ درجه و ٦٠ درجه) و کاهش مقدار نیروی محوری دارد (مانند شکلهای ۱۱ و ۱۲ این مقاله).

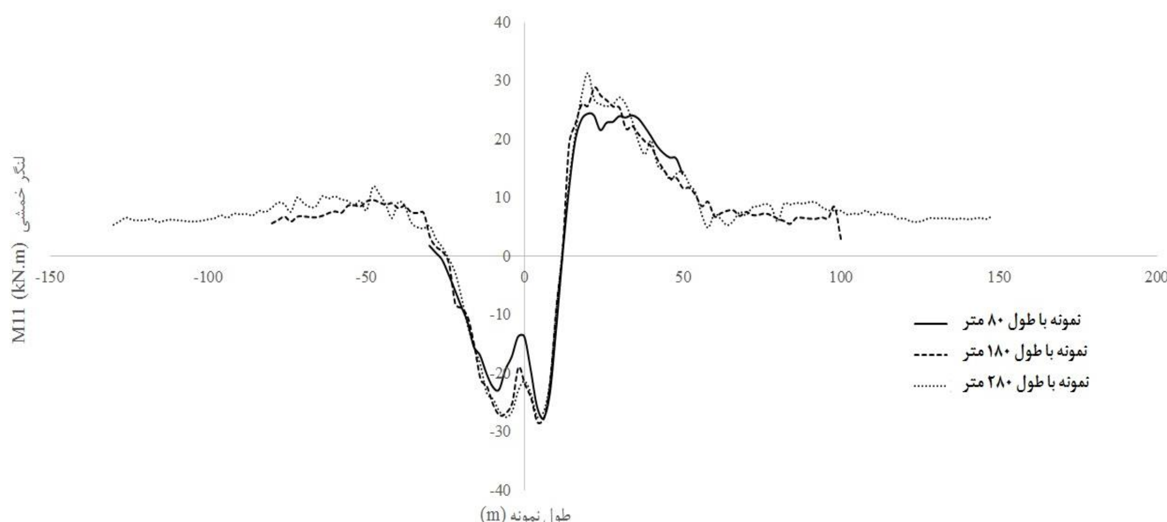
در شکل (١٤) نمودار لنگر خمشی (M11) وارد بر پوشش تونل در طول مدل، در مدل با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متری و برای زاویه‌های گســل ٤٥ درجه رســم شــده‌اند. همان طور که مشاهده می شود، افزایش طول مدل تغییر محسوسی در لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل ایجاد نمی‌کند.

بررسیها نشان می‌دهد که در زوایای گسل کمتر، که نسبت مؤلفه افقی جابه‌جایی به مؤلفه قائم آن بیشتر است، توجه به اثر مرزها در مدل سازی (فاصله مرزها از محل گسلش یا نسبت طول به عمق مدل) برای برآورد صــحیح نیروی افقی وارد بر پوشــش تونل، و در نتیجه تغییرشــکلها و کرنشــهای محوری، ضرورت دارد.

بـدین ترتیـب در تخمین نیروی محوری واقعی وارد بر پوشش تونل در مسئله انتشار گسلش برای زوایای گسل کمتر، جهت حذف اثرات نامطلوب مرز، مدل طویلتر (نسبت طول به عمق ۱۰–۱۵).



شکل ۱۳ نمودار نیروی محوری وارد بر پوشش تونل (N1) در طول مدل، در مدلهای با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متر و برای سه زاویه ٤٥، ٦٠ و ۹۰ درجه در شرایط خاک متراکم و تونل عمیقتر (مقادیر مثبت کشش و منفی فشار)



شکل ۱٤ نمودار لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل (M11) در طول مدل، در مدلهای با زاویه گسل ٤٥ درجه و با طولهای ۸۰، ۱۸۰ و ۲۸۰ متر در شرایط خاک متراکم و تونل عمیقتر

پیشنهاد می‌شود در حالی که برای زوایای نزدیک به قائم نسبت طول به عمق ٤ کفایت می‌کند. همچنین برای تخمین لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل، و تغییرشکلها و کرنشهای خمشی، در تمام زوایای گسل نسبت طول به عمق ٤-٥ مناسب می‌باشد.

طراحی سازه‌ای پوشش بتن در مقابل گسلش

بررسی عملکرد سازه بتنی در برابر نیروهای وارده برمبنای آیین‌نامه بتن ایران (مبحث نهم مقررات ملی ساختمان) [24]. برای یک مقطع از سازه بتنی با طول واحد و با نیروهای خروجی مدل‌سازی عددی انجام می‌شود. ابعاد مقطع یک مستطیل به طول واحد یعنی ۱۰۰۰ میلیمتر و عرض ۲٤۰ میلیمتر، که ضخامت بتن سازه بتنی می‌باشد، در نظر گرفته شده و فاصله آرماتورها مطابق استانداردهای اجرایی برابر ۷۵ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۱۵) هندسه مقطع رسم شده است.

در اینجا پوشش تونل تحت اثر توام نیروی محوری و خمش قرار گرفته است. لذا لازم است اندرکنش نیروی محوری و خمش مطابق روشهای مرسوم طراحی برای آن در نظر گرفته شود، اما به دلیلی که در ادامه توضیح داده خواهد شد، ابتدا ماکزیمم ظرفیت خمشی خالص (بدون حضور نیروی محوری) و ماکزیمم نیروی محوری (بدون حضور لنگر خمشی) مقطع فوق را به دست می‌آوریم.

$$\begin{cases} b = 1000\ mm \\ d = 240 - 75 = 175\ mm \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} f'_c = 30\ MPa \\ f_y = 420\ MPa \end{cases} \quad (۲)$$

$$\begin{cases} \alpha_1 = 0.85 - 0.0015\ f'_c = 0.805 > 0.67 \\ \beta_1 = 0.97 - 0.0025\ f'_c = 0.9 > 0.67 \end{cases} \quad (۳)$$

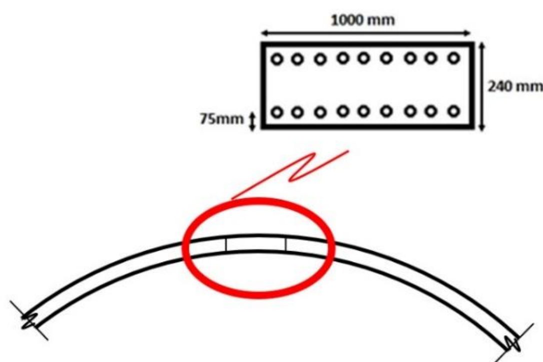
$$\begin{cases} f_{cd} = 0.6 f'_c \\ f_{yd} = 0.85 f_y \end{cases} \quad (٤)$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \quad (۵)$$

$$\rho_{max} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \times \frac{700}{700+f_y} = 0.0228 \quad (٦)$$

$$M_r = \rho b d^2 f_{yd}(1 - \rho \frac{f_{yd}}{2\alpha_1 f_{cd}}) \quad (۷)$$

$$\rho_{max} \rightarrow M_r = 179\ kN.m \quad (۸)$$



شکل ۱۵ هندسه عرض واحد از پوشش بتنی تونل

بنابراین حداکثر ظرفیت خمشی پوشش تونل ۱۷۹ کیلونیوتون-متر می‌باشد که از ماکزیمم مقادیر لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل (۳۰ کیلونیوتون مطابق شکل ۱۴) بیشتر است.

در ادامه حداکثر ظرفیت فشاری و کششی مقطع بتنی را به دست می‌آوریم.

تحمل کششی این مقطع (دو ردیف آرماتور بالا و پایین):

$$T = 2(\rho bd). f_{yd} = 2850\ kN \quad (۹)$$

تحمل فشار این مقطع:

$$C = bh \times 0.6 f_c' = 4320\ kN \quad (۱۰)$$

همان طور که دیده می‌شود با توجه به مقادیر نیروی محوری در شکل (۱۳) (ماکزیمم فشار و کشش ۲۰۰۰۰ کیلونیوتون در گسل ۹۰ درجه و ماکزیمم فشار ۳۸۰۰۰ کیلونیوتون در گسل ٤٥ درجه)، مقطع بتنی فوق، علی رغم ظرفیت تحمل خمش، قادر به تحمل چنین نیروی محوری (حتی بدون حضور لنگر خمشی) نمی‌باشد. از این رو راهکارهای جایگزین کاهش خطر گسلش مانند استفاده از اتصالات منعطف پیشنهاد می‌گردد [24].

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر پارامترهای مختلف شامل نوع خاک، زاویه گسل و عمق تونل بر مسیر انتشار گسلش، نمودارهای جابه‌جایی سطح خاک و همچنین تغییر شکل و نیروهای وارد بر پوشش تونل بررسی شد و ظرفیت خمشی و محوری پوشش تونل برای تحمل مقادیر حاصل بررسی شد. این نتایج را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

الف) تأثیر تونل در تغییر شکل خاک:

- تونل باعث ایجاد نواحی تمرکز کرنش در خاک زیر خود و تا حد زیادی مانع از رسیدن جابه‌جایی گسلش به لایه‌های خاک بالاسر خود می‌شود.
- حضور تونل باعث ایجاد بالازدگی نسبی در خاک دو طرف می‌شود. توجه به تفاوت تغییر شکل سطح زمین در بالاسر تونل و کناره‌ها، به لحاظ مهندسی اهمیت دارد زیرا سازه‌های سطحی را تحت تغییر شکل غیر یکنواخت قرار می‌دهد.
- حضور تونل موجب توزیع ملایمتر جابه‌جاییها در سطح زمین (کاهش گرادیان حداکثر تغییر شکل سطح زمین) در بالاسر خود می‌شود که با افزایش عمق تونل این تأثیرگذاری بیشتر است.
- ناحیه برشی تمرکز یافته در زیر تونل به سمت فرودیواره توسعه می‌یابد. لذا نسبت به شرایط زمین آزاد، مناطق فرودیواره مورد تهدید بیشتری هستند.

ب) نیروهای ایجاد شده در پوشش تونل تحت اثر گسلش:

- در گسلهای با زاویه ملایمتر نیروی محوری وارد بر پوشش تونل بیشتر می‌باشد. در گسل نزدیک به قائم بخشی از سقف تونل به کشش می‌افتد ولی در گسلهای با زاویه کمتر سقف تونل تماماً تحت فشار قرار می‌گیرد.
- در تونل عمیقتر نسبت به تونل سطحیتر، نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر پوشش تونل افزایش می‌یابد. این مطلب اهمیت زیادی در طراحی پوشش تونلهای عمیقتر دارد که باید مورد توجه طراحان قرار گیرد.
- در مدل‌سازی اندرکنش گسل و تونل در زوایای گسل نزدیک به قائم، انتخاب طول ٤-٥ برابر عمق لایه خاک برای مدل کفایت می‌کند. اما در زوایای گسل ملایمتر، جهت حذف اثرات نامطلوب مرز، طول مدل ۱۰-۱۵ برابر عمق لایه خاک پیشنهاد می‌شود. چنان چه ابعاد مدل کمتر انتخاب شود، مقادیر نیروی محوری بیشتر از مقدار واقعی برآورد خواهد شد (بین ۱/۵ تا ۲ برابر) و طراحی بر اساس آن مقرون به صرفه نخواهد بود. شایان ذکر است که انتخاب طول مدل کمتر (٥-٤ برابر عمق لایه خاک)، مشکلی در برآورد مقادیر لنگر خمشی ایجاد نخواهد کرد.

سپاسگزاری

مراجع

[1] J.D. Bray, R.B. Seed, H.B. Seed, "Analysis of Earthquake Fault Rupture Propagation through Cohesive Soils", *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 3, pp. 562-580, 1994.

[2] J. Johansson, K. Konagai, "Fault Induced Permanent Ground Deformations-An Experimental Comparison of Wet and Dry Soil and Implications for Buried Structure", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, pp. 45-53, 2006.

[3] I. Anastasopoulos, G. Gazetas, M.F. Bransby, M.C.R. Davies, A. El Nahas, "Fault Rupture Propagation through Sand: Finite-Element Analysis and Validation through Centrifuge Experiments", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 133, pp. 943-958, .2007.

[4] M.L. Lin, C.F. Chung, F.S. Jeng, "Deformation of Overburden Soil Induced by Thrust Fault Slip", *Engineering Geology*, vol. 88, pp. 70-89, 2007.

[5] D. Loukidis, G.D. Bouckovalas, A.G. Papadimitriou, "Analysis of Fault Rupture Propagation through Uniform Soil Cover", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 29, pp. 1389-1404, 2009.

[6] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modeling of Fault Rupture Propagation through Two-Layered Sands", *Scientia Iranica*; vol. 21, no. 1, pp.19-29, 2013.

[7] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modelling of Fault Rupture Propagation through Layered Sands", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 23, no. 9, 1139-1155, 2019.

[8] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM Simulation of Reverse Faulting through Sands with the aid of GPU Computing", *Computers and Geotechnics*, vol. 66, pp. 253-263, 2015.

[9] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM-Aided Study of Shear Band Formation in Dip-Slip Faulting through Granular Soils", *Computers and Geotechnics*, vol. 71, pp. 221-236, 2016.

[10] M. Hazeghian, A. Soroush, "Numerical Modeling of Dip-Slip Faulting through Granular Soils using DEM", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 97, pp. 155-171, 2017.

[11] M. Hazeghian, A. Soroush, "DEM Simulation to Study the Effect of the Ground Surface Geometry on Dip-Slip Faulting through Granular Soils", *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 24, no.7, pp. 861-879 2020.

[12] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, "Numerical Modeling of Reverse Fault Rupture Propagation through Clayey Embankments", *International Journal of Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 122-132, 2013.

[13] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, M. Khoshini, "Two-Dimensional Numerical Modeling of Fault Rupture Propagation through Earth Dams under Steady State Seepage", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 88, pp. 60-71, 2016.

[14] M. Naeij, A. Soroush, Y. Javanmardi, "Numerical Investigation of the Effects of Embedment on the Reverse Fault-Foundation Interaction", *Computers and Geotechnics*, vol. 113, 2019.

[15] M.H. Baziar, A. Nabizadeh, C.J. Lee, W.Y. Hung, "Centrifuge Modeling of Interaction between Reverse Faulting and Tunnel", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 65, pp. 151-164., 2014.

[16] M. Rojhani, M. Moradi, A. Ghalandarzadeh, S.Takada, “Centrifuge Modeling of Buried Continuous Pipelines Subjected to Reverse Faulting”, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 49, pp. 659-670, 2012.

[17] M. Kiani, T. Akhlaghi, A. Ghalandarzadeh, “Experimental Modeling of Segmental Shallow Tunnels in Alluvial Affected by Normal Faults”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 51, pp. 108-119, 2016.

[18] S. Joshi, A. Prashany, A. Deb, “Analysis of Buried Pipelines Subjected to Reverse Fault Motion”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, pp. 930-940, 2011.

[19] M. Hashemzadeh, A. Soroush, Z. Saffarzadeh Kermani, “Numerical Analysis of Behavior of Buried Steel Pipes Subjected to Dip Slip Faults”, *8th National Congress on Civil Engineering, Iran (Islamic Republic of)*, May 7-8, (2014).

[20] M. Ranjbarnia, M. Zaheri, D. Dias, “Three-Dimensional Finite Difference Analysis of Shallow Sprayed Concrete Tunnels Crossing a Reverse Fault or a Normal Fault: A Parametric Study”, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 14, pp. 998-1011, 2020.

[21] Plaxis, Inc. Plaxis Version 2017.01 user's manual, 2017.

[22] J.D. Bray, R.B. Seed, L.S. Clu, H.B. Seed, “Earthquake Fault Rupture Propagation through Soil”, *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 120, no. 3, pp. 543-561, 1994.

[23] M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, R. Solhmirzaei, “Effect of Mechanical Soil Properties on Fault Rupture Propagation through Granular Soils”, *15th World Conference on Earthquake engineering*, Lisbon, Portugal, (2012).

[24] A. Fazli, M. Mortazavi Zanjani, A. Soroush, “Investigating Mitigation Measures for Fault Rupture Hazard of Strike-Slip Faulting on Buried Pipelines by Numerical Modeling”, *13th International Congress on Civil Engineering*, Iran, October 17-19, (2023), (In Persian)